

结构面爬坡剪断耦合作用影响因子与影响规律

谭 洵¹, 吉 锋¹, 裴向军¹, 黄 江²

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 江西省建筑设计研究总院, 江西 南昌 361004)

摘 要: 为研究硬性结构面剪切过程中爬坡剪断耦合作用, 制作了不同高度 h 和坡度 α 组合的凸起体的硬性结构面三维模型, 开展模型剪切试验, 试验结果证实了两种作用的耦合。分析剪切运动特征, 提出了利用剪断面积 S_j 与剪切面积 S 的比值 K 定量表征爬坡和剪断耦合程度, 在不同的主导作用下 K 值变化在 0~1 之间, 并建立了考虑爬坡剪断耦合作用的抗剪强度算式, 可评价锯齿型硬性结构面抗剪强度影响规律, 得出抗压强度大的硬岩、表面起伏较平缓的结构面 K 值小, 爬坡摩擦对抗剪强度贡献的组分大; 抗压强度小的软岩、表面起伏较大的结构面 K 值大, 岩石材料的强度对抗剪强度贡献的组分大。

关 键 词: 结构面三维模型; 剪切试验; 爬坡; 剪断; 抗剪强度

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598-(2015) 增2-0245-08

Impact factors and influence law of joint overriding and cutting off coupling effect

TAN Xun¹, JI Feng¹, PEI Xiang-jun¹, HUANG Jiang²

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. Jiangxi Provincial Architectural Design and Research General Institute, Nanchang, Jiangxi 361004, China)

Abstract: In order to study overriding and cutting off coupling effect in process of joint shear, the joint three-dimensional models which have asperities of different combinations of height (h) and angle (α) are made for, conducting model shear tests. The test results confirm this coupling effect. The joint shear movement characteristics are analyzed; and a ratio of cutting off area S_j to shear area S , i.e. K , is proposed to present quantitative characteristics for the degree of coupling effect. In different dominant effect, the K changes between 0-1. Meanwhile, a shear strength formula which is involved in the coupling effect of overriding and cutting off is established to help valuating effect rule of joint shear strength. The results show not only that shear strength is largely determined by overriding friction when the K is low for hard rock with large compressive strength and for slightly undulated joint surface, but also that it is largely determined by strength of the rock material when the K is high for soft rock with small compressive strength and for roughly undulated joint surface.

Keywords: joint 3D model; shearing test; overriding; cutting off; shear strength

1 引 言

在隧道开挖、坝肩选址、不稳定边坡锚固等工程建设中, 完整的岩石常被各种不同尺度的结构面所切割, 由岩石与结构面组成的块体称之为结构体^[1]。这样的结构体具有结构特征, 其在受力情况下的变形与破坏首先受到结构面的影响, 因此结构面的力学性质备受关注。

结构面的抗剪力学性质研究是一个逐渐深入的过程, 众多学者进行了大量工作。Patton 等^[2]提

出强度计算公式, 在较低有效正应力下认为结构面上凸起体未遭破坏, 可用式(1)计算剪应力:

$$\tau = \sigma_n \tan(\varphi_b + i) \quad (1)$$

式中: i 为锯齿起伏角; φ_b 为齿面的摩擦角; σ_n 为正应力。

在较高有效正应力下结构面上凸起体遭到破坏, 可采用式(2)计算。

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (2)$$

收稿日期: 2015-01-09

基金项目: 自然科学基金(No.51308082); 地质灾害国家重点实验室青年基金(No.SKLG2011Z012); 成都理工大学大学生创新创业训练计划项目(No.14Z003-38)。

第一作者简介: 谭洵, 男, 1992年生, 硕士研究生, 岩土体稳定性及工程环境效应方向。E-mail: 1528911849@qq.com

式中: c 为两壁岩石的黏聚力; φ 为两壁岩石的内摩擦角。

在极低(大概只要不等于 0)的有效正应力下凸起体不可能完全不遭破坏,而在很高的(按工程实践的标准)有效正应力下也不可能完全遭破坏^[3]。Patton 双线型公式代表了两种极端情况,反映出结构面剪切过程中不同的作用效果。Barton^[4]在大量试验的基础上建立了表征不同粗糙度的抗剪强度公式:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[JRC \lg \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_b \right] \quad (2)$$

式中: JRC 为结构面的粗糙度系数; JCS 为结构面边壁岩石抗压强度; φ_b 为结构面边壁基本摩擦角(接近残余摩擦角)。

式(2)中各参数都可直接或间接得到,实用便捷,但对于粗糙度系数的获取需采取结构面的剖面曲线与典型结构面剖面曲线对照取值,具有较大的人为性,且二维有一定局限。Barton 之后,许多学者目光落到结构面的三维特性上,分形理论^[5-7]、三维激光扫描技术^[8]、叠层制造技术^[9]等理论与技术被运用到研究之中,对认识结构面三维表面起伏特征有重要意义,但结构面剪切过程中的抗剪作用机制并没有被很好地阐述。

为获取结构面力学参数一般可以进行剪切试验^[10],但是结构面样一次试验表面即遭破坏,重复试验获值不准确,因此采用一定的技术方法模拟结构面,制作结构面模型对结构面力学性质研究有极大价值。Patton^[2]注意到硬性结构面上凸起体对抗剪强度的影响,首次引入了锯齿状模型,模型材料为石膏粉加碎石英砂和高岭石。Kwon 等^[11]介绍了石膏材料的矩形凸起体硬性结构面模型。周瑞光等^[12]报道了石膏材料的锯齿状结构面力学模型,介绍爬坡角理论,并研究了剪切的剪应力-位移曲线特点,从曲线上划分出剪变形阶段、剪破坏阶段和剪碎段改造阶段。Seidel^[13]利用重塑的粉砂岩制作模型,引入边坡稳定分析方法中的 Sokolovski 准则来解释锯齿型凸起体的破坏,分析凸起体受力情况,说明从约束最大情况到临界转移情况之间以剪胀为主,从临界转移情况到不受约束之间为剪断为主。杨长义等^[14]采用石膏制作锯齿型凸起体硬性结构面模型,考虑到不同剪切方向的角度组合。黄曼等^[15]从相似理论出发,进行相似材料的力学性能试验,对结构面模型开展表面形态相似性评价和力学性质对比,开发制作接近真实结构面模型的工艺^[16]。

目前关于结构面模型凸起体有锯齿、矩形或波状起伏等,参数设置上有单峰、多峰等,但均为二维模型,与三维的真实结构面仍有所不同。便携式岩石剪切仪进行剪切试验是普遍使用的结构面抗剪强度评价方法,基于 Patton 公式,利用不同正应力下对应的峰值剪应力,绘制直线型强度包络线计算抗剪强度参数 c 和 φ 。然而,试验过程中不只发生着剪断,还伴随有爬坡作用的发生,爬坡作用造成剪胀现象,使剪切运动变得复杂,对试验结果也产生影响。大量研究对此做出定性描述多,但定量刻画爬坡作用与剪断作用对剪切的影响程度及其影响因素较少。本次试验中克服二维模型的不足,进行三维模型制作、剪切试验和数据分析,探讨硬性结构面在剪切过程中的剪切运动特征,对结构面剪切过程中表现出来的力学复杂性做出一定数学刻画。此外,3D 打印技术是一种以数字模型为基础快速成型技术的一种,运用于本文的精细结构面模具制作。

2 结构面三维模型制备与剪切试验

2.1 模型设计与材料

真实结构面表面起伏复杂,结构面上凸起体形状、尺寸、间距不一,影响剪切运动因素较多,采用概念化模型有助于详细研究凸起体对结构面剪切运动的影响。为使结构面模型具有三维的意义,设计四棱锥锯齿状凸起体模型,结构面上下盘可以相互咬合,与真实情况较为一致,见图 1。

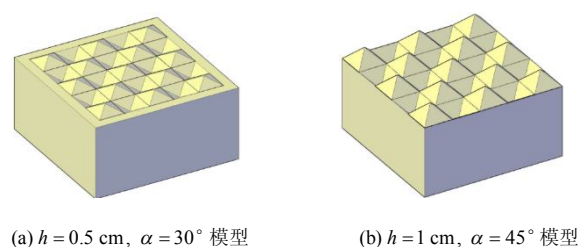


图 1 三维结构面模型
Fig.1 3D models of joint

凸起体尺寸设置为高 h 为 0.5、1.0 cm,坡角 α 为 30° 、 45° 、 60° ,结构面表面为 100 cm^2 ,相互组合共 6 种模型。这种概念模型放大了真实结构面的凸起体尺寸和间距,规则排列,将结构面表面起伏进行了单一化和可视化,其目的是排除其他复杂因素的影响,重点考虑主控结构面起伏程度的凸起体高度和坡度对结构面剪切的影响,针对此问题时此模型据有一定的普适性。选择水泥砂浆作为模

型材料，以满足材料易取、便于成型、较短时间内强度足够等要求。水泥砂浆的质量配比为：P.C 32.5R 型水泥：中粗砂：水：复合型早强剂=1：1.5：0.5：0.05。

2.2 模型制备

模型制作分制作模具、配制砂浆、浇灌和养护 4 步。利用特定规格的四棱锥钢锥在 PVC 板上钉出凹孔，蜡烛凝固成四棱锥状粘贴在 PVC 板凸出位置以制成结构面模具，见图 2(a)。运用 3D 打印技术制作凸起体精细的结构面模具，打印出尺寸 $h = 0.5\text{ cm}$ 和 $\alpha = 60^\circ$ 的结构面模具，见图 2(b)、2(c)。后续将配制好的砂浆进行浇灌、去模和养护，制成一个硬性结构面三维模型，见图 2(d)。养护方法：成型 2 d 后饱水养护 3 d 后在天然条件下养护 16 d。用同样的砂浆材料制作 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 小方块，养护完成后进行点荷载测试和直剪试验，获得黏聚力 $c = 2.91\text{ MPa}$ ，内摩擦角 $\varphi = 47^\circ$ ，抗压强度 $\sigma_c = 40\text{ MPa}$ ，抗拉强度 $\sigma_t = 4\text{ MPa}$ ，模型制备后的凸起体实际尺寸见表 1（表中 h 为高， α 为坡度）。

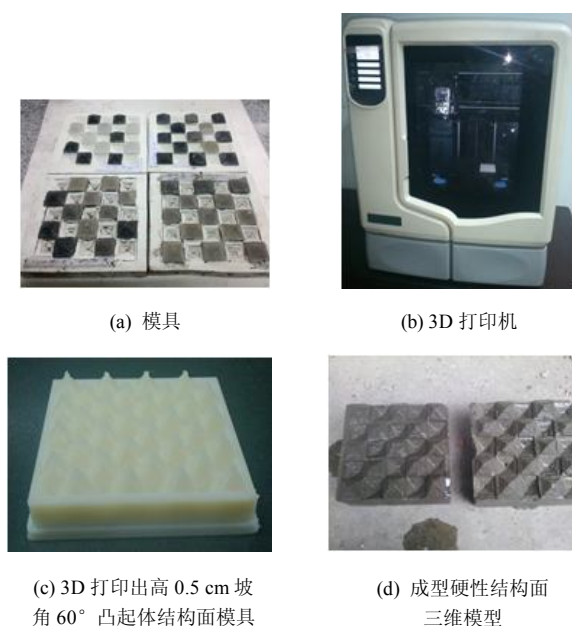


图 2 模型制作
Fig.2 Joint 3D model making

表 1 凸起体统计平均参数
Table 1 Statistical average parameters of asperities

编号 /组	设计值		统计平均值	
	h/cm	$\alpha/(^\circ)$	h/cm	$\alpha/(^\circ)$
1	1.0	45	0.89	43
2	1.0	30	0.91	29
3	1.0	60	0.75	51
4	0.5	45	0.39	40
5	0.5	30	0.48	34
6	0.5	60	0.29	51

2.3 剪切试验

试验设备为便携式岩石剪切仪，见图 3。模型制作完成后将其包裹入剪切盒大小的包裹体中，制备成剪切试样。试验确定 5 级正应力，每级正应力下分级加载剪应力施剪，施加剪应力后待位移值稳定，用百分表记录剪应力下的剪位移值、纵位移值。



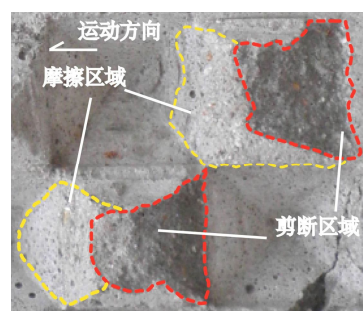
图 3 便携式剪切仪
Fig.3 Portable shear apparatus

3 剪切运动特征分析

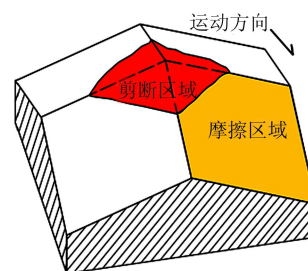
剪切试验完成后观察剪切破坏痕迹，分析数据。

3.1 摩擦区域与剪断区域

剪后结构面上留下剪切痕迹，但剪切痕迹并没有布满整个结构面表面，且剪切痕迹具有两种不同的特点：（1）局部或者整体破坏，凸起体被剪断，断面呈深色；（2）仅在表面有擦痕、剥蚀，痕迹呈浅色，但无局部和整体的破坏。如图 4 所示，摩擦



(a) 结构面试样上两种痕迹



(b) 剪断区域与摩擦区域示意图

图 4 两种剪切痕迹
Fig.4 Two kinds of shear trace

区域用黄色圈出, 剪断区域用红色圈出以示区分。

两种不同的剪切痕迹反映出结构面在剪切过程中凸齿所发生的不同抗剪作用, 摩擦和剪断共同组成剪切区域, 即

$$S_m + S_j = S \quad (3)$$

式中: S_m 为摩擦区域面积; S_j 为剪断区域面积; S 为有效剪切面积。可以认为摩擦区域与剪断区域的面积值代表了摩擦与剪断两种作用的程度。将垂直于模型表面拍摄的照片利用 AutoCAD 矢量化, 命令 MASSPROP 求出面积值, 选取其中一组试样面积计算如图 5 所示。由图可见, $h = 0.89 \text{ cm}$ 、 $\alpha = 43^\circ$ 试样组 5 个试样有不同的两种面积值, 且有效剪切面积均在原结构面整个表面 100 cm^2 以下。

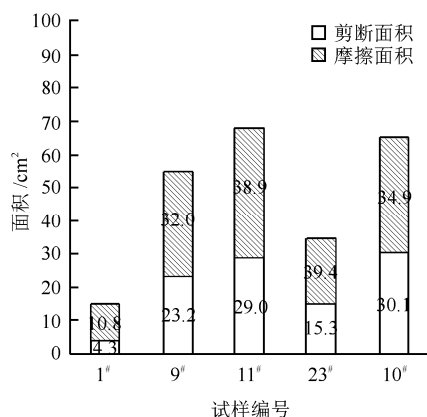


图 5 剪断面积与摩擦面积计算(单位: cm^2)

Fig.5 Cutting off and overriding area calculation model group(unit: cm^2)

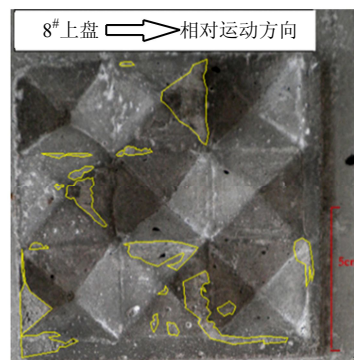
3.2 剪切运动特征

3.2.1 剪切运动类型

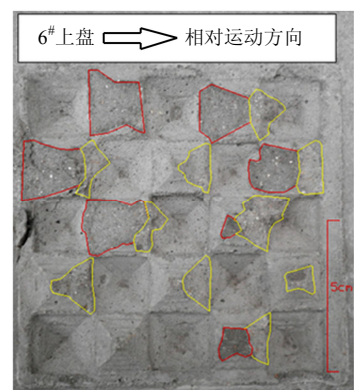
模型受剪时, 若施加的法向压力不足以平衡剪力分解在竖直方向的分力, 结构面上盘就会沿下盘凸起体坡面进行爬坡运动, 剪胀被触发, 剪力的峰值由爬坡过程中的摩擦提供; 若施加的法向压力足够大, 能抑制爬坡发生。当剪力持续增大, 凸起体可能直接被剪断, 凸起体破坏由材料的抗剪性能决定。

在普遍的情况中相互接触的凸起体之间首先发生爬坡, 爬坡到一定高度之后产生剪断, 即爬坡-剪断运动。上述 3 种运动特征如图 6 所示。

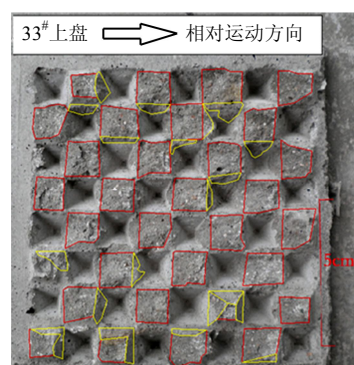
图 6(a)为典型的爬坡运动, 全是摩擦痕迹; 图 6(b)为爬坡-剪断运动, 摩擦与破坏痕迹均有; 图 6(c)不只破坏痕迹, 有少量摩擦依然存在, 纵使大量剪断, 也有爬坡的作用的发生。同一个结构面上的所有凸起体也不一定表现出一种运动, 可能是 3 种, 分析时以占优的运动为主。



(a) 典型的爬坡运动类型



(b) 爬坡-剪断耦合运动类型



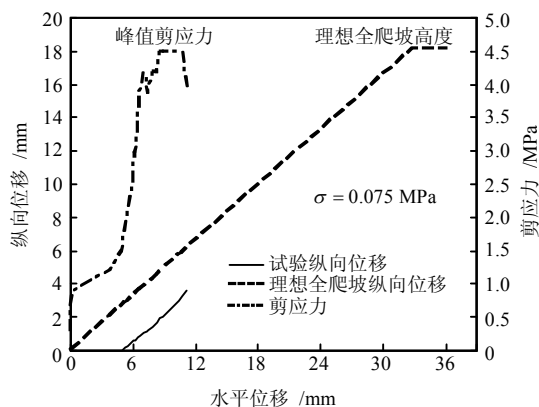
(c) 典型的剪断运动类型

图 6 剪切运动类型

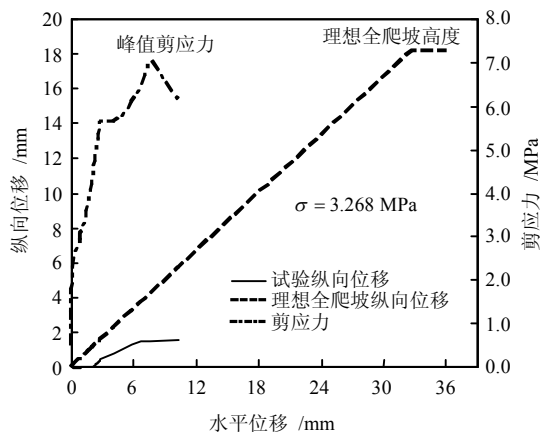
Fig.6 Types of shear movement

3.2.2 典型剪应力-剪位移及纵位移-剪位移曲线

图 7 为典型剪应力-剪位移及纵位移-剪位移曲线($h=0.91\text{ cm}, \alpha=29^\circ$)。剪位移发生时, 纵向位移并没有立即发生, 有些反而还下降, 说明刚受剪时试样凸起体间发生着抵紧, 伴随着已接触凸起体的局部摩擦和破损, 逐渐更多的凸起体会接触, 上下盘之间咬合变得紧密。随着剪切位移继续发生, 试验纵向位移曲线斜率接近理论值, 表明试样的剪胀角大致等于凸起体的坡角。剪应力达峰值之后, 纵向位移不再测量, 所能达到最高纵向位移远低于理想上不发生剪断的全爬坡最高纵向位移值。对比图 7 两个图, 相同尺寸下, 正应力越大, 试验纵向位移曲线越平缓; (b)图试验纵位移有一个平缓段, 其峰值剪应力可能由剪断提供, (a)图试验纵位移没有平缓段, 峰值剪应力可能由爬坡摩擦提供。



(a) 0.075 MPa 正应力下



(b) 3.268 MPa 正应力下

图 7 组结构面不同有效正应力下剪切结果

Fig.7 Cut results under different effective normal stresses

3.3 爬坡剪断耦合作用定量表征

3.3.1 剪断剪切面积比

典型爬坡运动下几乎全为黄色表示的摩擦区

域, 典型剪断运动下大部分为红色表示的剪断区域, 黄色区域为小部分, 普遍的爬坡-剪断运动下红黄区域均有, 记

$$K = S_j / S \quad (4)$$

式中: S_j 为剪断区域面积; S 为剪切区域面积。

用比值 K 来定量表示爬坡运动剪断运动的程度, K 值在 0~1 之间时, 值越高, 表示剪断运动越多; 值越低, 表示爬坡运动越多。如图 8 所示, K 值在 0.2 以下认定为爬坡占优, 0.8 以上为剪断占优。 K 值在 0.2 以下主要出现在低正应力下的低宽型凸起体的结构面模型, 在 0.8 以上主要出现在高正应力下的高窄型凸起体。

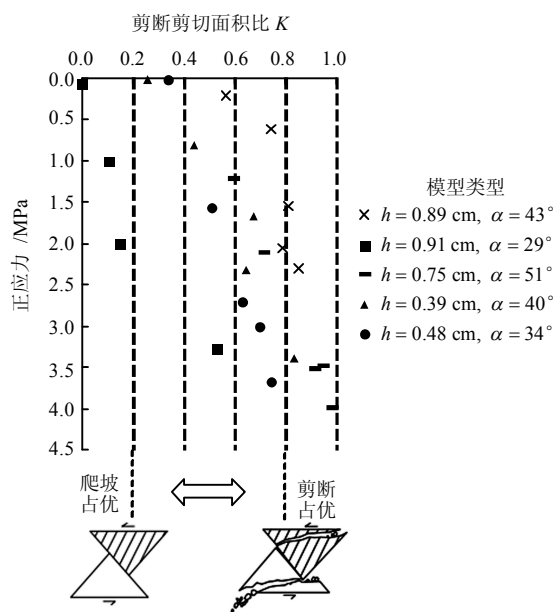


图 8 K 值分布

Fig.8 Distribution of K

3.3.2 影响因素及规律

K 值大小与正应力、材料强度、凸起体高度和凸起体坡度有关, 对各影响因素进行单因子分析。

(1) 正应力/抗压强度

正应力/抗压强度对 K 值的影响如图 9 所示。横轴为正应力与抗压强度的比值 σ_n / σ_c , 抗压强度 σ_c 本试验中为 40 MPa; 纵轴为 K 值, σ_n / σ_c 与 K 呈正相关, 越高的正应力下结构面上凸起体就以剪断为主。图中散点线大致可以分出 3 个阶段, 爬坡阶段、爬坡-剪断阶段和剪断阶段 (并不是所有模型都有 3 个阶段), 不同的模型表现出不同的 K 值分布: 线 2 是低宽型结构面凸起体, 当 $\sigma_n / \sigma_c < 0.0501$ 时, $K < 0.15$, 属于爬坡运动占优, 为爬坡阶段; 当 $\sigma_n / \sigma_c = 0.0817$ 时, $K > 0.53$, 属于爬坡-剪断阶段, 由于正应力的限制, 剪断阶段并未表现出来; 线 3

的高窄型结构面凸起体在 σ_n/σ_c 近似为 0 的情况下, $K > 0.6$, 为爬坡-剪断阶段, 但没有爬坡阶段, $\sigma_n/\sigma_c > 0.034$ 后, $K > 0.91$, 为剪断阶段, 且相同正应力下坡角越高, 剪切造成的剪断就越显著。

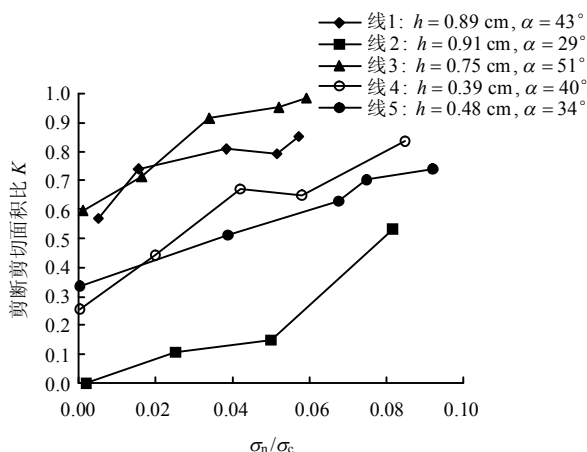
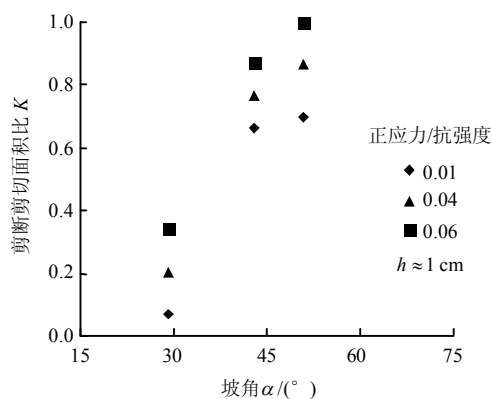


图9 正应力/抗压强度对 K 值的影响

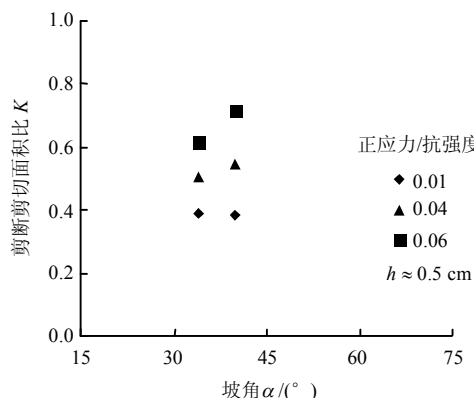
Fig.9 Effects of normal stress and compressive strength ratio for K

(2) 坡度对 K 值的影响

如图 10 所示, 运用 σ_n/σ_c 对 K 拟合公式计算



(a) $h \approx 0.5$ cm 试样组



(b) $h \approx 1$ cm 试样组

图10 坡角对 K 值的影响

Fig.10 Effect of slope angle on K

相同 σ_n/σ_c 下的 K 值。图 10(a)中, σ_n/σ_c 相同时, 坡度大的点高于坡度小的点, 图 10(b)中也出现这样的趋势, 表明相同 σ_n/σ_c 下高角度凸起体更容易剪断, 低角度凸起体容易爬坡。

(3) 高度对 K 值影响

如图 9 所示。线 2 整体分布于线 5 的下方, 较大的凸起体爬坡作用较显著, 而线 4 整体分布于线 1 下方, 较小的凸起体爬坡较为显著。所以高度值并不一致相关地影响 K 值。

正应力与坡度 2 个因素对结构面上凸起体何种运动的触发影响程度不同, 由趋势线斜率来看参数对 K 值的影响程度, 正应力对结果的影响程度大于坡角。

4 基于面积比的抗剪算式

Ladanyi 等^[17]考虑到结构面剪切过程中摩擦力、爬坡剪断现象、凸起体强度等因素对最大抗剪强度的综合影响, 从能量方面进行考虑, 提出了基于面积比的理论抗剪算式:

$$\tau = S_1(1 - K) + S_2K \quad (5)$$

式中: τ 为抗剪强度; S_1 为爬坡滑过凸起体不产生剪断所需的力; S_2 为剪断突起体所需要的力, 其他符号意义同前。在 Ladanyi 的分析中, 关键的参数 K 是通过经验公式得出, 缺乏一定的实验数据。

试验中得出数据见表 2。为找到 K 值与各参量之间的定量关系, 进行多元回归分析, 得出拟合公式:

$$K = 0.8734 + 6.2174\sigma_n/\sigma_c + 0.0297\alpha + 0.0036h \quad (6)$$

拟合相关性系数 $R^2 = 0.855$, 拟合效果较好。

式 (5) 中, S_1 部分通过能量方面进行考虑, 得出的最后公式较为复杂, 考虑利用式 (1) 代替式 (5) 中 S_1 , 见式 (7)。

$$\tau = \sigma_n \tan(\varphi_b + i)(1 - K) + (c + \sigma_n \tan \varphi)K \quad (7)$$

将式 (6) 代入式 (7), 建立结构面的爬坡剪断耦合强度算式。根据模型实测值进行验证, 具有一定匹配度。

模型为锯齿型凸起体结构面模型, 针对较为粗糙的近锯齿型起伏的结构面, 如能从真实结构面上

表 2 K 值计算结果
Table 2 Calculated results of K

σ_n / σ_c	$\alpha / (^\circ)$	h / mm	$K(S_f/S)$
0.005 3	43	8.9	0.57
0.015 6	43	9.2	0.74
0.038 6	45	8.9	0.81
0.051 6	43	9.2	0.79
0.057 4	43	8.5	0.85
0.001 9	30	9.6	0.00
0.025 1	29	9.1	0.10
0.050 1	29	9.9	0.15
0.081 7	29	9.4	0.53
0.001 2	51	7.5	0.60
0.016 3	52	7.7	0.71
0.034 0	51	7.5	0.91
0.052 0	48	6.7	0.95
0.059 3	51	7.5	0.99
0.000 2	40	3.9	0.26
0.020 1	38	3.8	0.44
0.041 9	40	3.9	0.67
0.057 9	40	4.1	0.65
0.084 8	40	4.1	0.83
0.000 3	43	4.8	0.34
0.039 0	31	4.8	0.51
0.067 6	43	4.8	0.63
0.075 0	34	5.2	0.70
0.091 8	34	4.8	0.74

提取计算参数高度值和坡度值,便可运用该式评估其抗剪强度。从式(7)还可以认识到,不同岩性、不同起伏的结构面试样在室内受剪过程中拥有不同程度的爬坡剪断耦合作用,此种耦合作用造成了结构面不同的力学性能。抗压强度大的硬岩、表面起伏较平缓的结构面 K 值小,爬坡摩擦对抗剪强度提供的组分大;抗压强度小的软岩、表面起伏较大的结构面 K 值大,岩石材料强度对抗剪强度提供的组分大。

5 结 论

(1) 硬性结构面剪切过程中爬坡作用和剪断作用耦合存在,结构面的剪切区域由摩擦和剪断区域共同组成,两种区域的面积值代表了两种作用的程度。

(2) 用剪断区域面积 S_f 与剪切区域面积 S 的比值 K 定量表示爬坡、剪断作用的程度;当 $K < 0.2$ 时以爬坡为主,当 $0.2 \leq K \leq 0.8$ 时,为爬坡-剪断;当 $K > 0.8$ 时以剪断为主。 K 值影响规律:正应力偏小,爬坡作用占优,正应力偏大,剪断作用占优;高度大角度大的高窄型凸起体上剪断作用占优,高度小角度小的低宽型凸起体上爬坡作用占优。正应

力影响的敏感性大于坡度。

(3) 建立了考虑面积比的抗剪强度算式(7),得到 K 值计算式(6),认识到评价锯齿型硬性结构面抗剪强度的影响规律,即抗压强度大的硬岩、表面起伏较平缓的结构面 K 值小,爬坡摩擦对抗剪强度提供的组分大;抗压强度小的软岩、表面起伏较大的结构面 K 值大,岩石材料的强度对抗剪强度提供的组分大。

参 考 文 献

- [1] 杜时贵. 结构面与工程岩体稳定性[M]. 北京: 地震出版社, 2006.
- [2] PATTON F D. Multiple modes of shear failure in rock[C]//Proceedings of 1st Cong. Int. Soc. Rock Mech.. Lisbon: [s. n.], 1966: 509—513.
- [3] 成都地质学院工程地质教研室. 岩石裂隙强度[M]. 北京: 地质出版社, 1982.
- [4] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. **Rock Mechanics Felsmechanik Mécanique des Roches**, 1977, 1(10): 1—54.
- [5] 曹平, 贾洪强. 岩石节理表面三维形貌特征的分形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 3839—3843.
CAO Ping, JIA Hong-qiang. Fractal analysis of three-dimensional topography characteristics of rock joint surface[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(2): 3839—3843.
- [6] 刘艳章, 盛建龙, 葛修润, 等. 基于岩体结构面分布分形维的岩体质量评价[J]. 岩土力学, 2007, 29(5): 971—975.
LIU Yan-zhang, SHENG Jian-long, GE Xiu-run, et al. Evaluation of rock mass quality based on fractal dimension of rock mass discontinuity distribution[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 29(5): 971—975.
- [7] 周宏伟, 谢和平, KWASNIEWSKIMA. 粗糙表面分维计算的立方体覆盖法[J]. 摩擦学学报, 2000, 20(6): 455—459.
ZHOU Hong-wei, XIE He-ping, KWASNIEWSKIMA. Fractal dimension of rough surface estimated by the cubic covering method[J]. **Tribology**, 2000, 20(6): 455—459.
- [8] 夏才初, 王伟, 丁增志. TJXW-3D 型便携式岩石三维形貌仪的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1505—1512.
XIA Cai-chu, WANG Wei, DING Zeng-zhi. Development of three-dimensional TJXW-3D typed portable rock surface topography[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(7): 1505—1512.